

**НАВІГАЦІЙНІ ЗАСОБИ ОРІЄНТУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ  
ОБ'ЄКТІВ**

З давніх часів мандрівники задавалися питанням: як визначити своє місце розташування на Землі? Стародавні мореплавці орієнтувалися по зірках, що вказують напрямок руху. З появою компаса завдання істотно було спрощено. Мандрівник уже меншою мірою залежав від погоди.

Ера радіо відкрила нові можливості перед людиною. З появою радіолокаційних станцій, коли стало можливим вимірювати параметри руху і відносно розташування об'єкта по відбитому від його поверхні променю радіолокатора. У 1957 році в СРСР група вчених під керівництвом В. А. Котельникова експериментально підтвердила можливість визначення параметрів руху штучного супутника Землі (ШСЗ) за результатами вимірювань доплерівського зсуву частоти сигналу, який випромінювався цим супутником. Але, що найголовніше, була встановлена можливість розв'язання оберненої задачі - знаходження координат приймача за вимірним доплеровському зрушенню сигналу, який випромінювався з ШСЗ, якщо параметри руху і координати супутника відомі [1]. При русі по орбіті супутник випромінює сигнал певної частоти, номінал якої відомий на приймальній стороні (споживач). Положення ШСЗ в кожен момент часу відомо, точніше, його можна обчислити на підставі інформації, закладеної в сигналі супутника. Користувач, вимірюючи частоту сигналу, який до нього прийшов, порівнює її з еталонною і таким чином обчислює доплеровський зсув частоти, яка обумовлена рухом супутника. Вимірювання проводяться безперервно, що дозволяє скласти свого роду функцію зміни частоти Доплера. У певний момент часу частота стає рівною нулю, а потім змінює знак. У момент рівності нулю частоти Доплера споживач знаходиться на лінії, яка є нормаллю до вектору руху супутника. Використовуючи залежність крутизни кривої доплеровської частоти від відстані між

споживачем і ШСЗ і вимірявши момент часу, коли частота Доплера дорівнює нулю, можна обчислити координати споживача.

Таким чином, штучний супутник Землі стає радіонавігаційною опорною станцією, координати якої змінюються в часі внаслідок руху супутника по орбіті, але заздалегідь можуть бути обчислені для будь-якого моменту часу завдяки ефемеридній інформації, закладеної в навігаційному сигналі супутника.

Після успішного запуску СРСР першого штучного супутника землі, в США в Лабораторії прикладної фізики Університету Джона Гопкінса проводяться роботи, пов'язані з можливістю вимірювання параметрів сигналу, випромінюваного супутником. За вимірами обчислюються параметри руху супутника щодо наземного пункту спостереження. Рішення оберненої задачі – стає справою часу.

На основі цих досліджень у 1964 р. в США створюється доплеровська супутникова радіонавігаційна система першого покоління «Transit». Основне її призначення - навігаційне забезпечення пуску з підводних човнів балістичних ракет Поларіс. Батьком системи вважається директор Лабораторії прикладної фізики Р. Кершнер. Так само, як і в системі "Цикада", в системі «Transit» координати джерела обчислюються за доплеровським зрушенням частоти сигналу одного з 7 видимих супутників. ШСЗ систем мають кругові полярні орбіти з висотою над поверхнею Землі - 1100 км, період обертання супутників "Transit" дорівнює 107 хвилинам. Точність обчислення координат джерела в системах першого покоління у великій мірі залежить від похибки визначення швидкості джерела. Так, якщо швидкість об'єкта визначена з похибкою 0,5 м, то це в свою чергу призведе до помилки визначення координат - 500 м. Для нерухомого об'єкта ця величина зменшується до 50 м.

Однією з основних проблем, що виникають при створенні супутникових систем, що забезпечують навігаційні визначення по декількох супутниках, є взаємна синхронізація сигналів (шкал часу) супутників з необхідною точністю. Неузгодженість опорних генераторів супутників на 10 нс призводить до помилки у визначенні координат споживача 10-15 м [2]. Другою проблемою, з якою зіткнулися розробники при створенні високоорбітальних супутникових навігаційних систем, стало високоточне визначення і прогнозування параметрів орбіт ШСЗ. Апаратура приймача, під час виміру затримки сигналів від різних супутників, обчислює координати споживача.

Для цих цілей в 1967 році ВМС США була розроблена програма, за якою було здійснено запуск супутника TIMATION-I, а в 1969 році - супутника TIMATION -II. На борту цих супутників використовувалися кварцові генератори. У той же час, ВПС США паралельно вели свою програму з використання широкосмугових сигналів, модульованих псевдощумовим кодом (PRN). Кореляційні властивості такого коду дозволяють використовувати одну частоту сигналу для всіх супутників, з кодовим поділом сигналів від різних супутників. Пізніше, в 1973 році дві програми були об'єднані в одну загальну під назвою «Navstar-GPS» [2].

**Мережева радіонавігаційна супутникова система (СРНСС) Глонасс**

Система Глонасс призначена для глобальної оперативної навігації приземних рухомих об'єктів. За своєю структурою Глонасс так само, як і GPS, вважається системою подвійної дії, тобто може використовуватися як у військових, так і в цивільних цілях [4,5]. Система в цілому включає в себе три функціональні частини (у фаховій літературі ці частини називаються сегментами) (рис. 1).

- Космічний сегмент, в який входить орбітальне угруповання штучних супутників Землі (іншими словами, навігаційних космічних апаратів);

- Сегмент управління, наземний комплекс управління (НКУ) орбітального угрупованням космічних апаратів;

- Апаратура користувачів системи.

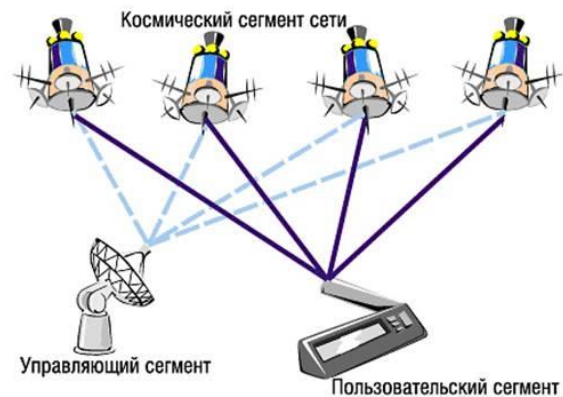


Рис.1. Сегменти високоорбітальних навігаційних систем ГЛОНАСС і GPS

В системі Глонасс в якості радіонавігаційної опорної станції використовуються навігаційні космічні апарати (НКА), що обертаються по круговій геостационарній орбіті на висоті - 19100 км (рис. 2). Період обертання супутника навколо Землі дорівнює, в середньому, 11:00 45 хвилин. Час експлуатації супутника - 5 років, за цей час параметри його орбіти не повинні відрізнятись від номінальних значень більше ніж на 5%. Сам супутник являє собою герметичний контейнер діаметром 1,35 м і довжиною 7,84 м, всередині якого розміщується різного роду апаратура. Живлення всіх систем проводиться від сонячних батарей. Загальна маса супутника - 1415 кг. До складу бортової апаратури входять: бортовий навігаційний передавач, хронізатора (години), бортовий керуючий комплекс, система орієнтації стабілізації і так далі.

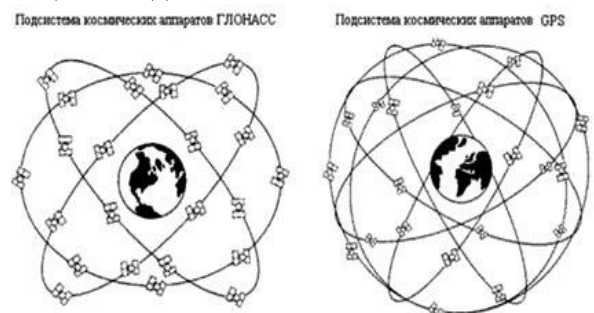


Рис. 2. Космічний сегмент систем ГЛОНАСС і GPS

**Мережева радіонавігаційна супутникова система GPS**

Американська система GPS за своїми функціональними можливостями аналогічна системі Глонасс. Її основне призначення - високоточне визначення координат споживача, складових вектора швидкості, і прив'язка до системної шкали часу [2, 6].

Як і система Глонасс, GPS складається з космічного сегмента, наземного командно-вимірювального комплексу і сегмента споживачів.

**Структура навігаційних радіосигналів системи Глонасс**

В системі Глонасс використовується частотне розділення сигналів (FDMA), випромінюваних кожним супутником - двох фазоманіпулірованих сигналів. Частота першого сигналу лежить в діапазоні L1 ~ 1600 МГц, а частота другого - в діапазоні L2 ~ 1250 МГц. Номінальні значення робочих частот радіосигналів, що передаються в діапазонах L1 і L2, визначаються виразом:

$$f_{k1} = f_1 + kDf_1$$

$$f_{k2} = f_2 + kDf_2 \quad k = 0, 1, \dots, 24, \quad (1)$$

де  $k = 0, 1, \dots, 24$  - номери літер (каналів) робочих частот супутників;

$$f_1 = 1602 \text{ МГц}; \quad Df_1 = 9/16 = 0,5625 \text{ МГц};$$

$$f_2 = 1246 \text{ МГц}; \quad Df_2 = 7/16 = 0,4375 \text{ МГц}.$$

Для кожного супутника робочі частоти сигналів в діапазоні L1 і L2 когерентні і формуються від одного еталону частоти. Відношення робочих частот несучої кожного супутника:

$$Df_{k1} / Df_{k2} = 7/9.$$

Номінальне значення частоти бортового генератора, з погляду спостерігача, що знаходиться на поверхні Землі, рівно 5,0 МГц.

У діапазоні L1 кожен супутник системи Глонасс випромінює 2 несучі на одній і тій же частоті, зрушені один щодо одного по фазі на  $90^\circ$ .

Одна з несучих піддається фазовій маніпуляції на  $180^\circ$ . Модулюючий сигнал отримують складанням за модулем 2 трьох двійкових сигналів:

- грубого далекомірного коду, переданого зі швидкістю 511 Кбіт / с;

- послідовності навігаційних даних, переданих зі швидкістю 50біт / с;

- меандрового коливання, переданого зі швидкістю 100 біт / с.

Сигнал в діапазоні L1 (аналогічний C/A - кодом в GPS) доступний для всіх споживачів в зоні видимості КА. Сигнал в діапазоні L2 призначений для військових потреб, і його структура не розкривається.

**Структура навігаційних радіосигналів системи GPS**

В системі GPS використовується кодове розділення сигналів (СДМА), тому всі супутники випромінюють сигнали з однаковою частотою. Кожен супутник системи GPS випромінює дві фазоманіпулірованих сигналу. Частота першого сигналу становить  $L1 = 1575,42$  МГц, а другого -  $L2 = 1227,6$  МГц. Сигнал несучої частоти L1 модулюється двома двійковими послідовностями, кожна з яких утворена шляхом підсумовування по модулю 2 далекомірного коду і переданих системних і навігаційних даних, формованих зі швидкістю 50 біт/с. На частоті L1 передаються два квадратурні компоненти, біфазної маніпульовані двійковими послідовностями. Перша послідовність є сумою по модулю 2 точного далекомірного коду P або засекреченого коду Y і навігаційних даних. Друга послідовність також є сумою по модулю 2 грубого C/A (відкритого) коду і тій же послідовності навігаційних даних.

Радіосигнал на частоті L2 біфазної маніпулювати тільки однієї з двох раніше розглянутих послідовностей. Вибір модулюючої послідовності здійснюється по команді з Землі.

**Визначення координат споживача**

Для визначення координат споживача необхідно знати координати супутників (не менше 4) і дальність від споживача до кожного видимого супутника. Для того, щоб споживач міг визначити координати супутників, випромінювані ними навігаційні сигнали моделюються повідомленнями про параметри їх руху. В апаратурі споживача відбувається виділення цих повідомлень і визначення координат супутників на потрібний момент часу.

Координати і складові вектора швидкості змінюються дуже швидко, тому повідомлення про параметри руху супутників містять відомості не про їх координати

тах і складових вектора швидкості, а інформацію про параметри деякої моделі, апроксимуючої траєкторію руху КА на досить великому інтервалі часу (близько 30 хвилин). Параметри апроксимуючої моделі змінюються досить повільно, і їх можна вважати постійними на інтервалі апроксимації.

В апаратурі споживача виділяється інтервал часу між моментом часу, на який потрібно визначити положення супутника, і вузловим моментом. Потім за допомогою апроксимуючих функцій та їх параметрів, виділених з навігаційного повідомлення, обчислюються значення параметрів моделі оскулюючих елементів на потрібний момент часу. На останньому етапі за допомогою звичайних формул кеплеровської моделі визначають координати і складові вектора швидкості супутника.

В системі Глонасс для визначення точного положення супутника використовуються диференціальні моделі руху. У цих моделях координати і складові вектора швидкості супутника визначаються чисельним інтегруванням диференціальних рівнянь руху КА, що враховують кінцеве число сил, що діють на КА. Початкові умови інтегрування задаються на вузловий момент часу, що розташовується посередині інтервалу апроксимації.

Як було сказано вище, для визначення координат споживача необхідно знати координати супутників (не менше 4) і дальність від споживача до кожного видимого супутника, яка визначається в навігаційному приймачі [4] з точністю близько 1 м. Для зручності розглянемо найпростіший «плоский» випадок, представлений на рис. 3.

Кожен супутник (рис. 3) можна представити у вигляді точкового випромінювача. У цьому випадку фронт електромагнітної хвилі буде сферичним. Точкою перетину двох сфер буде та, в якій знаходиться споживач.

Висота орбіт супутників становить порядок 20000 км. Отже, другу точку пе-

ретину кіл можна відкинути через апріорних відомостей, так як вона знаходиться далеко в космосі.

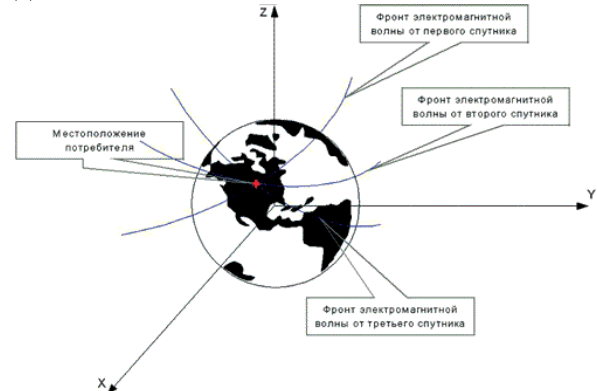


Рис. 3. Визначення координат споживача

### Висновок

Загальний напрямок модернізації обох супутникових систем GPS і Глонасс пов'язано з підвищенням точності навігаційних визначень, поліпшенням сервісу, що надається користувачам, підвищенням терміну служби і надійністю бортової апаратури супутників, поліпшенням сумісності з іншими радіотехнічними системами і розвитком диференціальних підсистем. Загальний напрямок розвитку систем GPS і Глонасс збігається, але динаміка і досягнуті результати сильно відрізняються.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Радиотехнические системы. Под ред. Казаринова Ю.М. М.: В. школа, 1990.
2. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000.
3. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. М.: ИПРЖР, 1998.
4. Липкин И.А. Спутниковые навигационные системы. М.: Вузовская книга, 2001.
5. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. М.: КНИЦ ВКС, 1995.
6. Interface Control Document: NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces (ICD-GPS-200). Rockwell Int. Corp. 1987.